

Анализ и картографирование структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов на основе фотограмметрических облаков точек

А. А. Медведев, Н. О. Тельнова, А. В. Кудиков, Н. А. Алексеенко

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия

E-mail: natalia.telnova@gmail.com

Работа посвящена методике получения и обработки данных оптической съёмки с малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — фотограмметрических облаков точек и производных трёхмерных моделей — для автоматизированного определения и картографирования структурных параметров древостоя на примере редкостойных северотаёжных лесов центральной части Кольского п-ва. Рассматриваются основные технологические подходы к организации и проведению съёмок на разных высотных эшелонах, алгоритмы классификации фотограмметрических облаков точек для извлечения модели древесного полога, анализа модели древесного полога для извлечения структурных характеристик отдельных деревьев и лесных насаждений в целом. На уровне отдельных деревьев картографируются проекции и высоты крон; на уровне лесных насаждений — высоты древесного полога, пики крон, плотность древостоя, сомкнутость крон. Для преодоления ограничений использования фотограмметрических облаков точек, связанных с извлечением и анализом модели древесного полога в сомкнутых древостоях, предложено комплексирование материалов разносезонных оптических съёмок и независимая обработка моделей полога для древостоев различной сомкнутости.

Ключевые слова: трёхмерная структура древостоев, лесные насаждения, модели древесного полога, плотность полога, фотограмметрические облака точек, БПЛА

Одобрена к печати: 21.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163

Введение

Независимое или комплексное использование высокодетальных данных наземного и воздушного лазерного сканирования, оптической и мультиспектральной съёмки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки различных структурно-функциональных характеристик лесных насаждений практикуется в мире достаточно широко с начала 2000-х гг. Особенность перечисленных данных дистанционного зондирования (ДДЗ) заключается в том, что строящиеся на их основе производные трёхмерные высокодетальные модели (в виде облаков точек, цифровых моделей местности, древесного полога) позволяют детально детектировать не только горизонтальную, но и вертикальную структуру лесных сообществ на разных масштабных уровнях (от отдельных деревьев до крупных лесных насаждений), выделять и анализировать биофизические параметры по различным ярусам лесной растительности. Ранее подобные исследования были возможны только в ходе наземных полевых измерений в пределах отдельных пробных площадей (Næsset, 2002).

Первоначально методы таксационной оценки древостоев на основе их трёхмерного моделирования разрабатывались и апробировались для данных воздушного лазерного сканирования, получаемых при съёмке с диапазона высот свыше 1 км и охватывающих значительные площади (Gobakken et al., 2013). Однако высокая себестоимость получения и предварительной обработки лидарных данных, а также необходимость в проведении оперативного дистанционного мониторинга лесов на локальном уровне приводит с середины 2010-х гг. к активному развитию методов определения структурно-функциональных параметров лесов по мультиспектральным и оптическим высокодетальным снимкам с БПЛА на основе современных методов фотограмметрической обработки с использованием алгоритмов компьютерного зрения «структура из движения» (Dandois, Ellis, 2013; Goodbody et al., 2019).

Преимущества от использования высокодетальных оптических и мультиспектральных ДДЗ, получаемых при съёмках с БПЛА, заключаются в следующем: 1) возможность трёхмерного моделирования лесных экосистем на различных масштабных уровнях (от отдельных деревьев до лесных насаждений) благодаря использованию разных высотных эшелонов съёмки; 2) привлечение спектральной информации в видимом (RGB — при оптической съёмке, RGBNIR — при мультиспектральной) и тепловом диапазонах для улучшения распознаваемости специфических свойств объектов разного типа; 3) возможность высокой повторяемости съёмки и получения оперативных данных со сверхмалых высот; 4) низкая себестоимость получения и обработки ДДЗ с БПЛА по сравнению с лидарными данными, особенно при использовании малых аппаратов мультироторного типа, оснащённых оптическими RGB-камерами (Dandois, Ellis, 2013; Giannetti et al., 2018; Tang, Shao, 2015; Zhang et al., 2016). В задачах лесоустройства, инвентаризации, долговременного и оперативного мониторинга лесов оптическая и мультиспектральная съёмки с БПЛА на сверхмалых высотах имеют значительный потенциал, так как позволяют проводить выборочное оперативное обновление данных о параметрах лесных насаждений на небольших участках (Puliti et al., 2017; White et al., 2016).

В отечественной практике применение данных оптической съёмки с БПЛА для оценки лесных ресурсов и состояния лесов базируется в основном на автоматизированном и визуальном дешифрировании цветных ортофотомозаик в видимом диапазоне: в частности, для автоматического выделения контуров крон (Алешко и др., 2017), визуального распознавания сухостоя и анализа его пространственного распределения (Санников и др., 2018). Целью настоящей статьи является разработка и апробация методики определения и картографирования эксплицитных структурных параметров редкостойных северотаёжных лесов по результатам анализа фотограмметрических облаков точек и производных трёхмерных моделей. Задачи исследования включают: обоснование и реализацию объектно-ориентированной технологии съёмок с БПЛА; анализ возможностей и ограничений алгоритмов выделения моделей древесного полога по фотограмметрическим облакам точек; автоматизированное извлечение характеристик отдельных деревьев и аналитическое картографирование структурных параметров лесных насаждений; наземную валидацию результатов.

Объекты исследования и технология съёмок с БПЛА

В качестве тестовых участков для выявления и картографирования параметров древесного полога по данным разновысотных и разносезонных съёмок с БПЛА были выбраны два участка редкостойных северотаёжных лесов, расположенные в Мурманской обл. в центральной части Кольского п-ва. Для участка 1 в западной части бассейна оз. Имандра характерно разнообразие типов рельефа: сочетание экзарационных скальных и озовых гряд и разделяющих их заболоченных понижений и долин ручьёв. Естественные лесные насаждения представлены разреженными и нарушенными скальными сосняками, редины мелколиственных пород (берёзы, осины), свыше 40 % площади участка занимают молодые и средневозрастные сосновые посадки, формирующие очень плотный верхний полог (рис. 1, см. с. 152). Участок 2 расположен к югу от Хибинского горного массива в бассейне р. Айкуайвенйок в пределах холмистой моренной равнины и отличается преобладанием редкостойных средневозрастных елово-берёзовых, еловых и берёзовых лесов и редколесий (Лесной..., 2019).

При планировании и проведении тематических исследований на основе данных с БПЛА особое внимание необходимо уделять разработке и обоснованию методики проведения съёмок. В частности, выбор строго определённого высотного эшелона съёмки обуславливает распознаваемость объектов исследования и возможности надёжного определения их свойств и признаков (Медведев, Алексеенко, 2017). Для изучения структуры лесных экосистем на уровне отдельных деревьев и на уровне лесных насаждений нами были выбраны два разновысотных эшелона съёмки со сверхмалых высот: 50 и 100 м.

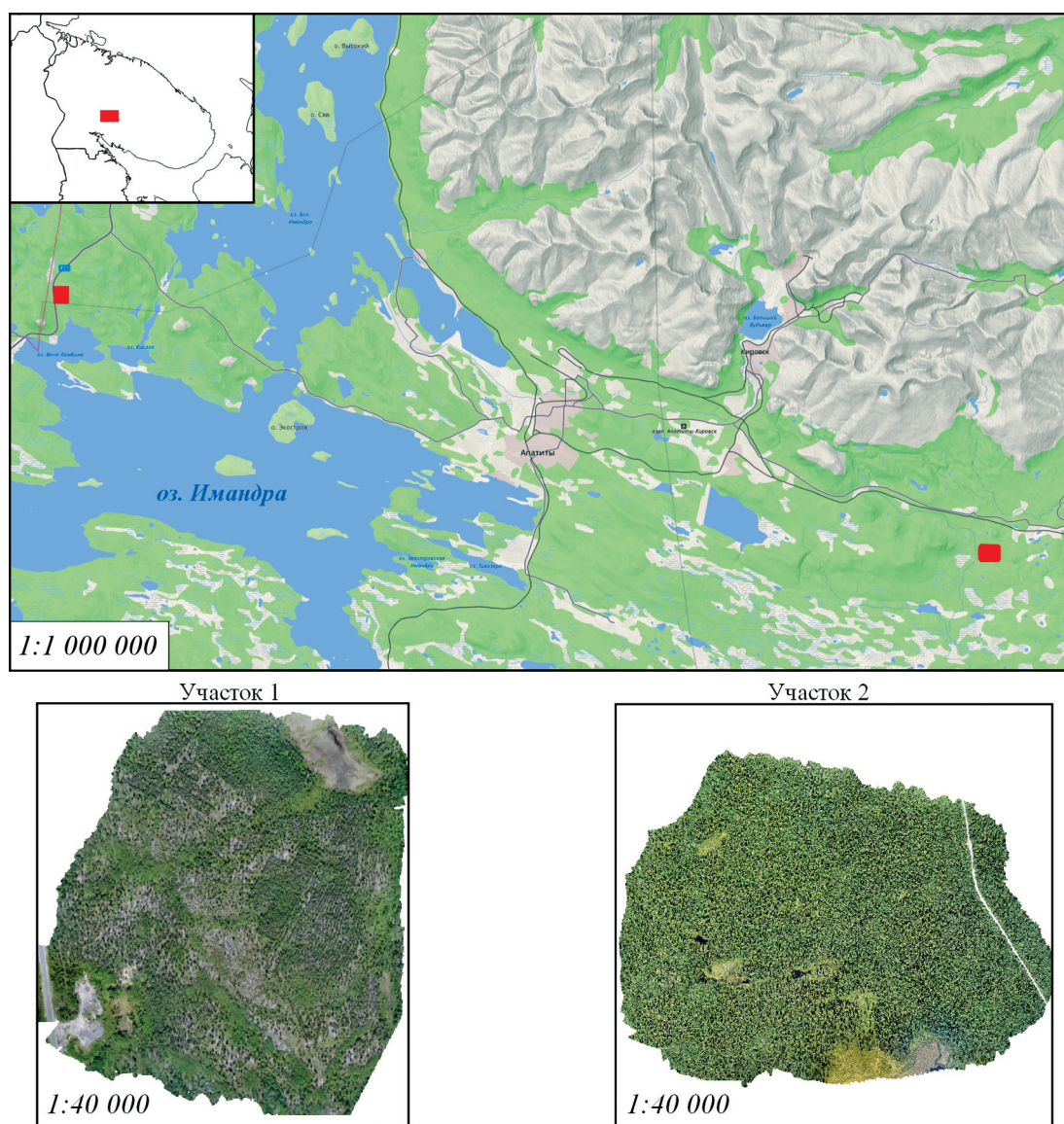


Рис. 1. Схема расположения и ортофотомозаики тестовых участков

При высоте съёмки 50 м получаемые данные дистанционного зондирования позволяют извлекать параметры отдельных деревьев и кустарников (положение стволов, высота, диаметр кроны) на локальном уровне в пределах пробных площадей. Такая съёмка проводилась на двух пробных площадях в пределах участков в летний период.

Площадная съёмка со значительным охватом территории с высоты 100 м проводилась в различные сезоны: в период активной вегетации (июль 2018 г.) и зимнего покоя древесной растительности (апрель 2019 г.). Данные площадной съёмки с высоты 100 м использовались для определения основных пространственно-распределённых структурных характеристик лесных насаждений в целом на площадях до 1 км².

Для съёмок с разных высот использовались БПЛА мультироторного типа: с высоты 50 м — квадрокоптер DJI Inspire 1 Pro; с высоты 100 м — квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro. Оба БПЛА оснащены оптическими RGB-камерами, гиростабилизирующими платформами и навигационными GNSS-приёмниками (GNSS — Global Navigation Satellite Systems, глобальные спутниковые системы навигации), позволяющими получать координаты центральных точек снимков. Управление полётами и съёмкой с БПЛА осуществлялось в ручном режиме так, чтобы получаемые снимки имели перекрытие по маршруту не менее 90 %, а перекрытие между маршрутами — 80 %.

Таблица 1. Параметры оптической съёмки на разных высотных эшелонах и характеристики итоговых данных

	Высотные эшелоны съёмки			
	50 м		100 м	
Модель БПЛА	DJI Inspire 1 Pro		DJI Phantom 4 Pro	
Модель камеры	ZenMuseX5/FC550		DJI FC6310	
Фокусное расстояние, мм	16		8,8	
Размер изображений, пиксель	4608×3456		5472×3078	
Характеристики данных	Участок 1	Участок 2	Участок 1	Участок 2
Даты съёмок	18.07.2018	09.07.2018	18.07.2018/10.04.2019	09.07.2018/10.04.2018
Количество исходных снимков	185	92	586/953	1173/487
Размер файлов облаков точек ASPRS LAS/LAZ, Гбайт	2,5	1,1	5,5/14,7	10,3/4,2
Средняя плотность фотограмметрических облаков точек, точек на квадратный метр	810	650	260/1634	236/326
Пространственное разрешение ортофотомозаик, см	1,2	1,5	3,1/1,9	3,4/2,1
Пространственный охват итоговых данных, км ²	0,02	0,02	0,83/1,21	0,74/0,79

Предварительная и фотограмметрическая обработка оптических снимков проводилась в специализированном программном обеспечении (ПО) Agisoft Metashape, позволяющем создавать высококачественные трёхмерные модели на основе цифровых фотографий с использованием алгоритмов SfM — «структура из движения» (Руководство..., 2019). Сформированные наборы данных в виде фотограмметрических плотных облаков точек после полуавтоматической фильтрации областей «высокого» и «низкого» шумов и итоговые ортофотомозаики экспортировались из ПО Agisoft Metashape для дальнейшего анализа. Параметры съёмок и характеристики исходных и итоговых наборов данных приведены в *табл. 1*.

Методика выделения древесного полога

Для трёхмерного анализа и моделирования структурных параметров растительного покрова по данным как лидарной, так и оптической съёмки используется цифровая модель высот древесного полога (*англ.* canopy height model — СНМ) — матрица разности высот между цифровой моделью местности и цифровой моделью рельефа (Lisein et al., 2013).

Для построения цифровой модели рельефа по фотограмметрическому облаку точек необходимо провести их классификацию путём присвоения всем точкам облака номинативных атрибутов по специальной типологии, встроенной в файловый формат ASPRS LAS, и в первую очередь определить принадлежность точек классу «земная поверхность» (*англ.* ground). Классификация облаков точек производилась с использованием автоматического классификатора встроенного модуля Color Lidar Module в геоинформационном ПО Global Mapper. Для автоматического выделения точек класса «земная поверхность» итеративно подбирались пользовательские параметры, зависящие от особенностей участка съёмки и разнообразия структуры древесного полога: размер локальной окрестности, эквивалентный среднему диаметру крон на участке; число стандартных отклонений высоты точек от среднего по окрестности; параметры среднего уклона и диапазона высот земной поверхности на площади съёмки. Результаты автоматической классификации проверялись при помощи построения трёхмерных поперечных профилей через всё облако точек; вручную выделялись и переклассифицировались

массивы ошибочно классифицированных точек. Стоит отметить, что высокая плотность построенных фотограмметрических облаков точек при значительной разреженности северотаёжных древостоев позволяет с высокой надёжностью и регулярностью выделять точки класса «земная поверхность» (рис. 2).

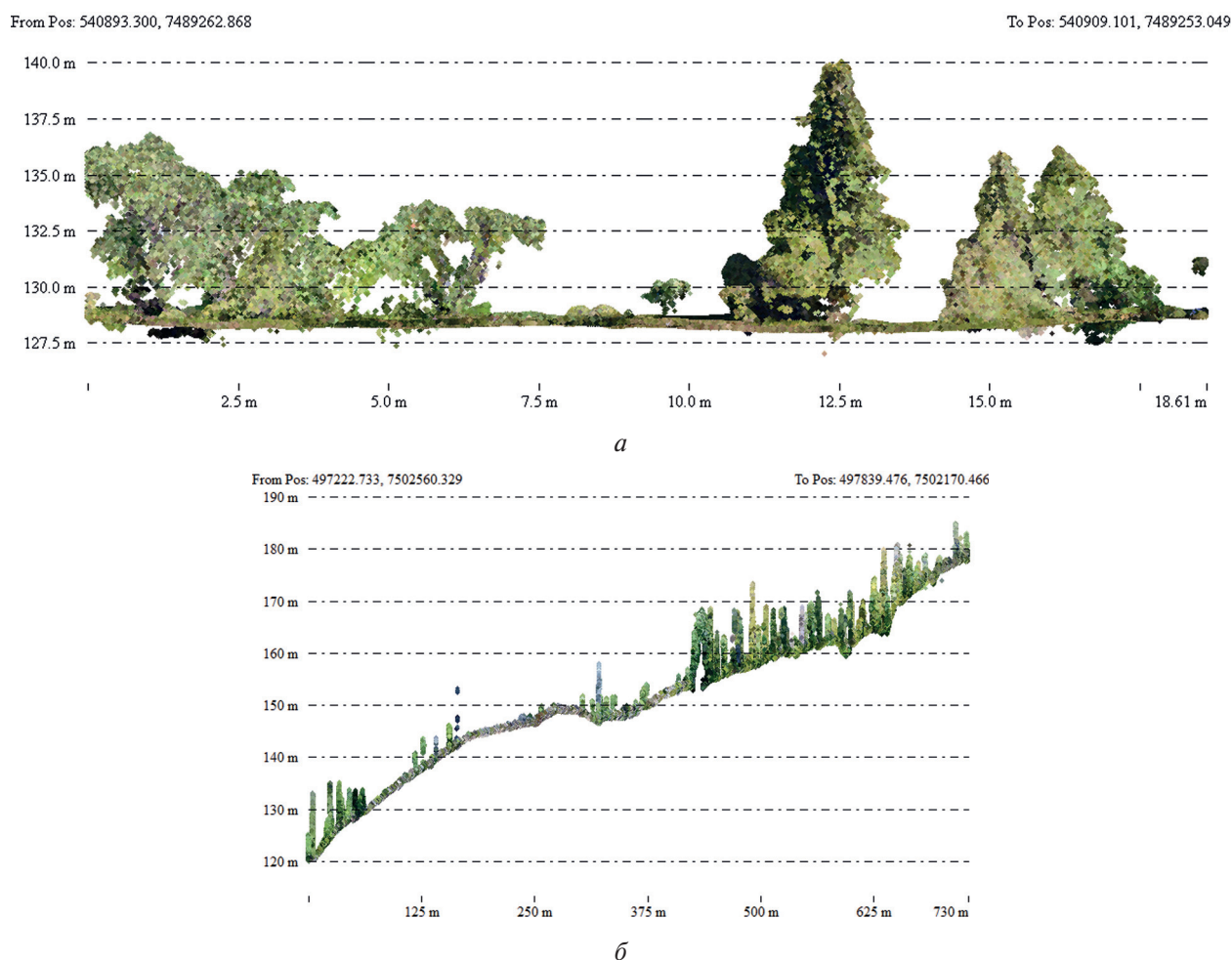


Рис. 2. Поперечные профили через фотограмметрические облака точек, полученные в результате разновысотных оптических съёмок: *а* — данные съёмки с высоты 50 м, участок 2; *б* — данные съёмки с высоты 100 м, участок 1

Принципиальная проблема построения модели древесного полога по данным оптической фотограмметрии заключается в том, что в условиях сомкнутого древесного полога точек в облаке, описывающих уровень земной поверхности, может быть недостаточно для построения корректной модели рельефа, поэтому в исследованиях, проводимых для крупных территорий при высокой сомкнутости крон древостоев, фотограмметрические облака точек комплексировуются с лидарными (Gobakken et al., 2013; Granholm et al., 2015). В отсутствие лидарных данных для построения модели древесного полога целесообразно комплексировать данные разновысотных съёмок (Bohlin et al., 2016).

В нашем случае на участке 2 молодые сомкнутые сосновые посадки произрастают в условиях сильно расчленённого рельефа, что формирует высокую неопределённость при построении цифровой модели рельефа, когда используются только данные оптической съёмки в летний период. Для решения этой проблемы были привлечены данные съёмки в период зимнего покоя древесной растительности. При построении моделей рельефа на территории, маскированные по высокой плотности полога хвойных пород, использовались разреженные облака точек по данным зимней съёмки, имеющие низкий уровень шума. После нормализации

и комплексирования полученные модели рельефа использовались для выделения древесного полога в сомкнутых древостоях.

На основе проведённой классификации облаков точек строились цифровые модели местности и рельефа в растровом представлении. Операция арифметического вычитания растров использовалась для получения цифровой модели древесного полога СНМ (*англ.* canopy height model). Итоговое пространственное разрешение цифровых моделей древесного полога в зависимости от плотности классифицированного облака точек составило для различных участков при съёмке с 50 м — 1–2 см, со 100 м — 2–4 см, высотное разрешение — 1 см.

Анализ модели древесного полога для извлечения структурных параметров древостоев

Определение и картографирование параметров древостоев по трёхмерным моделям древесного полога проводится на двух масштабных уровнях: на уровне отдельных деревьев и на уровне всей площади, занимаемой лесным насаждением (White et al., 2016).

Для выявления отдельных деревьев в пологе и определения их характеристик используются объектно-ориентированные подходы анализа данных съёмки с БПЛА (Alexander et al., 2018; Mohan et al., 2017): пространственная сегментация модели древесного полога методом водоразделов, пространственные преобразования с выделением фокальных статистик (локальных максимумов, мер контраста, энтропии) и морфометрических характеристик (крутизны, поперечной кривизны поверхности полога и др.).

Важным этапом анализа модели древесного полога, предшествующим сегментации и выделению пиков крон, является обработка модели сглаживающим фильтром Гаусса, параметры которого подбираются интерактивно в зависимости как от пространственного и высотного разрешения самой модели полога, так и от плотности древостоя. Сглаживание модели необходимо для снижения уровня шума при сегментации модели полога, связанного, в частности, со сложной формой крон мелколиственных пород (Tanhuanpää et al., 2016).

Для пробных площадей, охваченных съёмкой с высоты 50 м, нами проведена сегментация выделенных моделей древесного полога методом водоразделов. Полученные границы сегментов, отфильтрованные по порогу высоты 2 м, образуют распределения проекций крон отдельных деревьев на разных высотных уровнях (*рис. 3*, см. с. 156).

При анализе структурных параметров древостоя на уровне насаждений на основе данных, обладающих значительным пространственным охватом, по ячейкам регулярной сети агрегируются и картографируются простые дескриптивные статистики цифровой модели древесного полога (например, средние и максимальные высоты); по данным о распределении сегментов и локальных максимумов моделей древесного полога (пиков крон) рассчитываются интегральные показатели плотности древостоя и проективного покрытия древесного полога — сомкнутости крон (Giannetti et al., 2018; Ni et al., 2018; Tuominen et al., 2015). Такой подход позволяет в дальнейшем сопоставлять высокодетальные данные дистанционного зондирования с БПЛА с данными более низкого пространственного разрешения (Sentinel-2 MSI, Landsat-8 OLI), в частности, для оценки параметров надземной фитомассы (Puliti et al., 2018).

Для всей площади каждого из тестовых участков по данным съёмок со 100 м нами получены распределения основных структурных параметров древостоев: высот древесного полога, плотности деревьев, сомкнутости крон различного пространственного разрешения (*рис. 4*, см. с. 157).

Для валидации количества выделенных пиков крон в различных по плотности полога древостоях осуществлялся сплошной подресный учёт на пробных площадях 50×50 м, заложенных в трёх тестовых контурах, характеризующих различные по степени сомкнутости полога и породному составу древостои (*табл. 2*). Сопоставление определяемых на местности деревьев с автоматически выделенными пиками крон проводилось на основе визуального дешифрирования ортофотомозаик с наложенными на них точками пиков и границ крон и GPS-границ тестовых пробных площадей фиксации (GPS — Global Positioning System,

система глобального позиционирования). В плотных, но регулярных сосновых посадках пробная площадь закладывалась от границ насаждения.

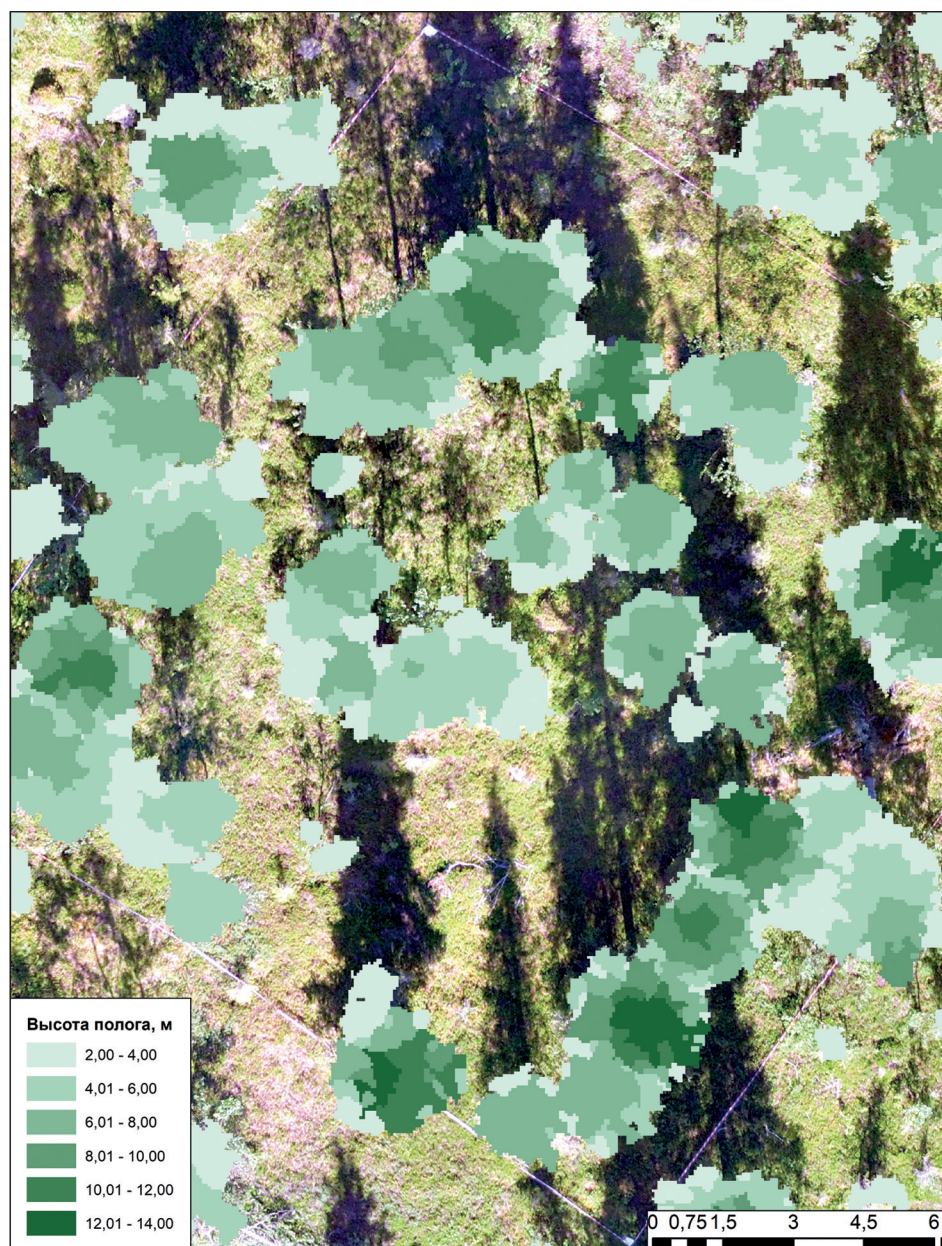


Рис. 3. Распределение проекций крон деревьев по высоте.
Пробная площадь на участке 1; данные съёмки с высоты 50 м

Таблица 2. Оценка точности автоматического выделения пиков крон по моделям древесного полога (съёмка с высоты 100 м) по сравнению с данными наземного подровесного учёта на пробных площадях

Тестовые пробные площади	Точность выделения пиков крон, %	
	по материалам летней съёмки	по материалам летней и зимней съёмок
Молодые регулярные сосновые посадки с сомкнутостью полога свыше 80 %, участок 1	60	80
Редины сосны по гари, участок 1	85	70
Берёзово-еловое редколесье вороничное, участок 2	87	73

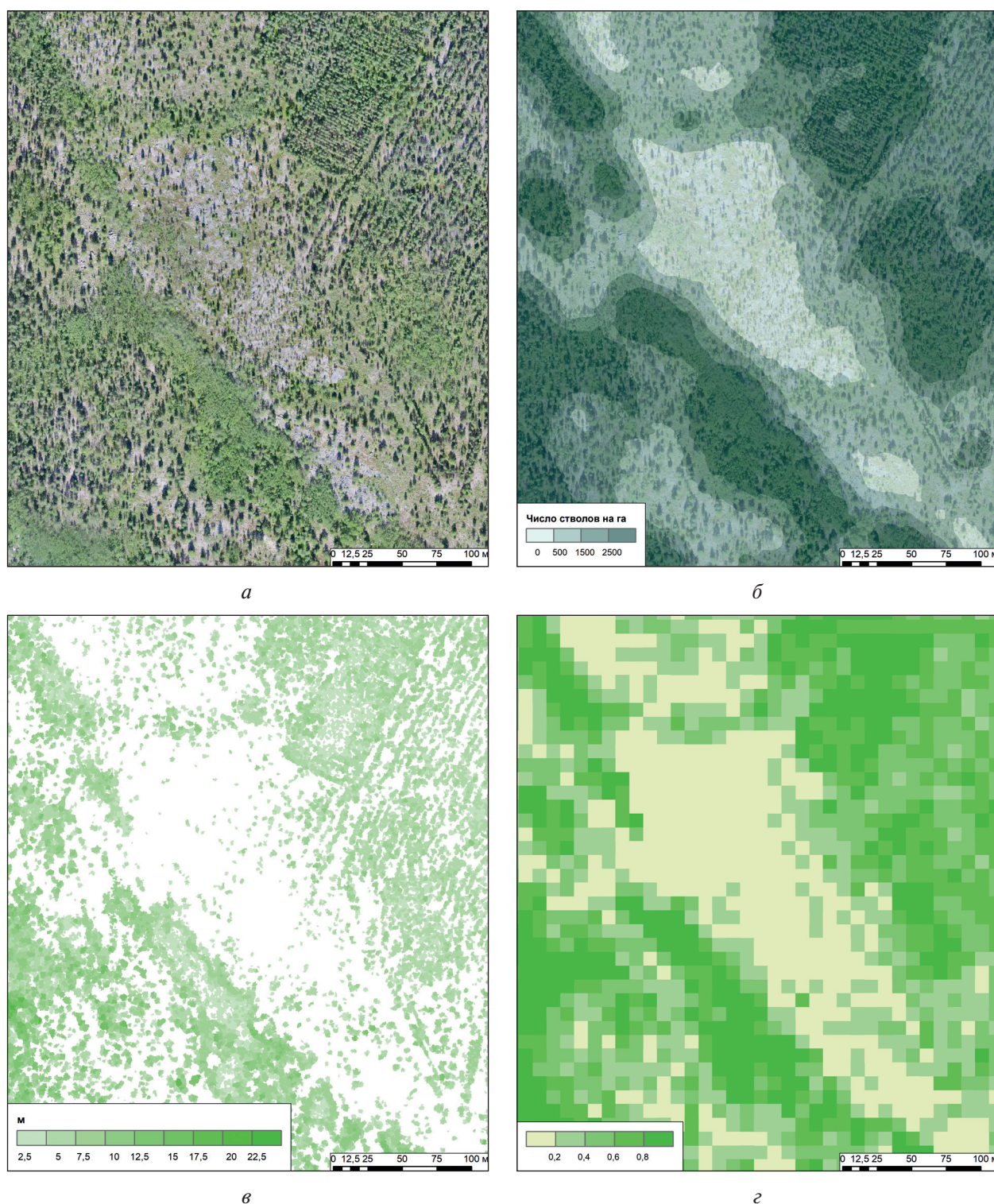
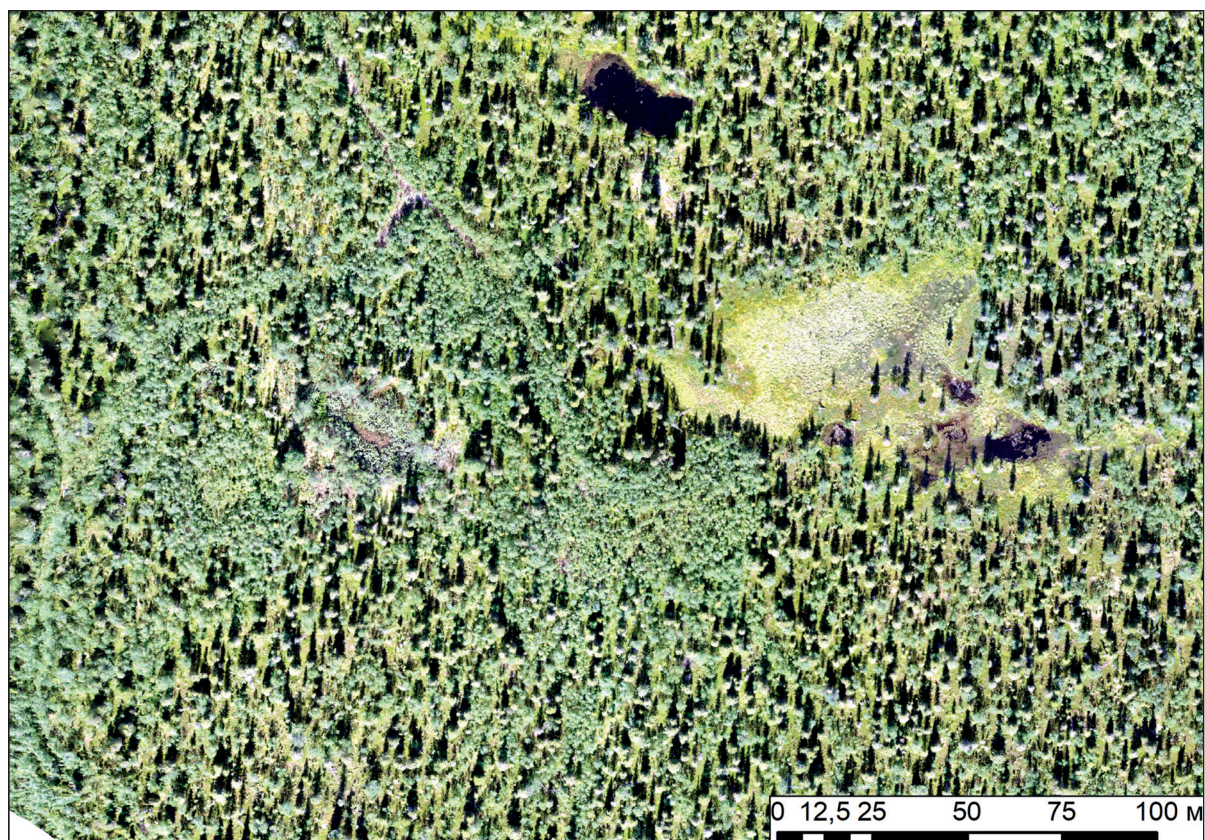
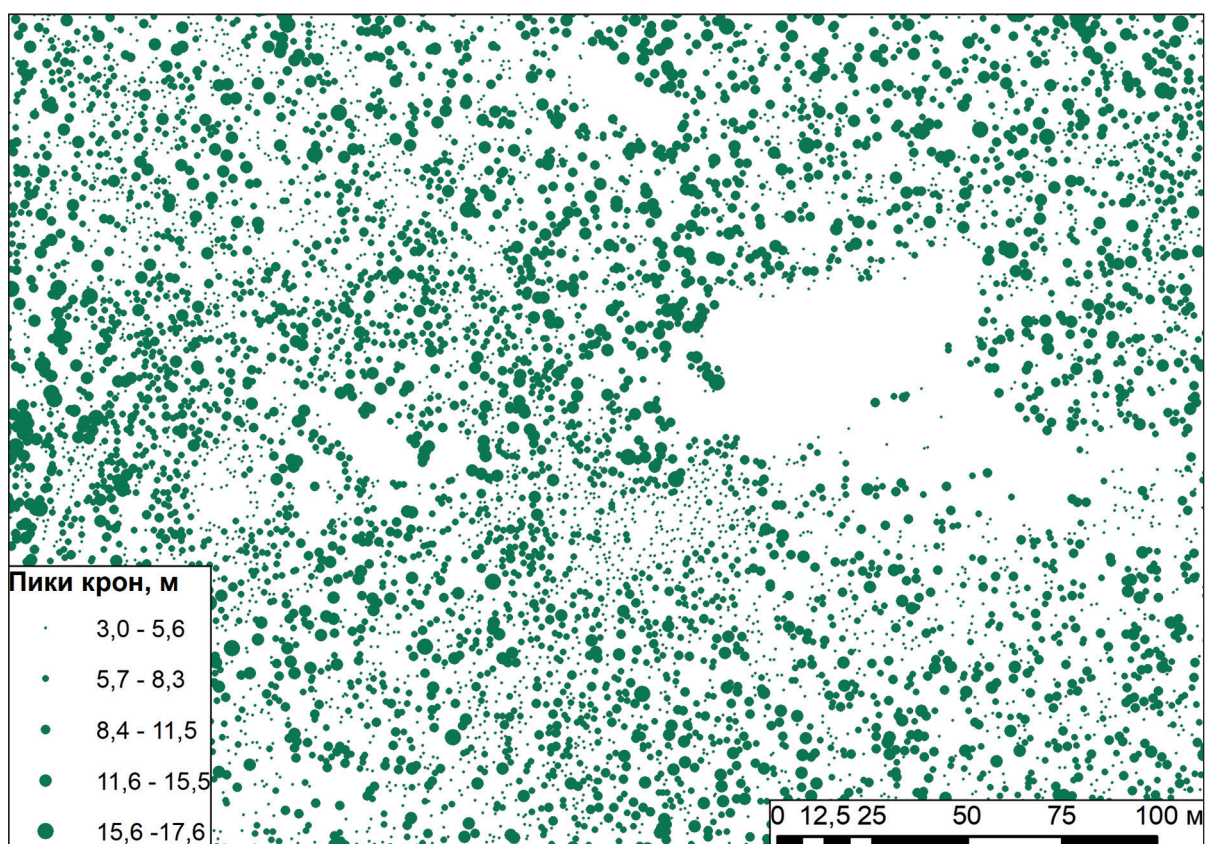


Рис. 4. Примеры пространственных распределений структурных параметров древостоев на участке 1, построенных по результатам анализа фотограмметрических облаков точек: а — ортофотомозаика; б — распределение плотности деревьев, наложенное на ортофотомозаику; в — средняя высота древесного полога; г — сомкнутость крон

Наибольшая точность выделения пиков крон по материалам только летней съёмки для берёзово-еловых вороничных редколесий связана с в целом равномерной и довольно низкой плотностью полога на участке 2 (рис. 5, см. с. 158), что определяет достаточность использования только материалов летней съёмки и применения универсальных параметров сглаживания и анализа моделей древесного полога для этой территории.



a



b

Рис. 5. Плотность древостоя на участке 2 (фрагмент): *a* — ортофотомозаика; *b* — пики крон, автоматически выделенные по данным летней съёмки с высоты 100 м и их высотное распределение

Для молодых моnodоминантных и сильно сомкнутых посадок сосны увеличение точности детектирования числа стволов по автоматически извлечённым пикам крон в случае зимней съёмки объясняется лучшим качеством модели зимнего древесного полога для этого типа насаждений за счёт возможности адекватного выделения точек класса «земная поверхность» по разреженному облаку точек.



Рис. 6. Результаты наземной валидации числа автоматически определённых пиков крон по двум пробным площадям на участке 1 (в пределах сомкнутых сосновых посадок, северо-западная часть орфотомозаики, и редин сосны по гари): 1 — пики крон, соответствующие данным наземного подреберного учёта; 2 — ошибочно определённые пики крон; 3 — пропущенные при автоматизированном выделении пики крон; 4 — проекции крон, полученные по данным сегментации модели древесного полога

Большое разнообразие территории участка 1, в том числе с точки зрения высокой неоднородности плотности древостоев, их породного состава и сомкнутости крон, определяет необходимость независимой обработки моделей древесного полога по крупным зонам, различающимся по плотности древесного полога. В частности, необходимость такого зонирования определяется тем, что при обработке универсальных моделей древесного полога, охватывающих значительные территории, применение универсальных параметров сглаживающего фильтра к единой модели древесного полога, предшествующее его пространственной сегментации и выделению «локальных максимумов» — пиков крон, приводит либо к существенному увеличению ошибки приписки пиков крон в плотных древостоях, либо, за счёт увеличения параметров сглаживания модели, увеличивает ошибки пропуска даже в пределах редины для изолированных отдельно стоящих деревьев (рис. 6, см. с. 159).

Таким образом, при выделении и анализе моделей древесного полога на участках с различной плотностью древостоев необходимо привлекать данные разносезонных, в том числе зимних, съёмок для более надёжного выделения пиков крон в сомкнутых хвойных древостоях, проводить независимо фильтрацию и сегментацию моделей полога для наиболее плотных и сильно изреженных древостоев.

Заключение

Для редкостойных северотаёжных лесов Кольского п-ва нами успешно апробированы методы определения эксплицитных структурных параметров как отдельных деревьев, так и лесных насаждений, основанные на анализе фотограмметрических плотных облаков точек и производных трёхмерных моделей древесного полога. Для увеличения точности выделения модели древесного полога и пиков крон предложено комплексировать материалы разносезонных оптических съёмок для территорий с густым сомкнутым древостоем и монодоминатным породным составом.

Высокодетальное дистанционное зондирование с БПЛА в оптическом диапазоне может рассматриваться как перспективный ключевой уровень мониторинга северных лесов на крупномасштабном уровне, обеспечивая корректный переход от подспутниковых наземных исследований к тематическим продуктам о распределении биофизических параметров лесного покрова, получаемым по спутниковым данным среднего и относительно высокого разрешения.

Работа выполнена по Госзаданию № АААА-А19-119022190168-8 (съёмочное оборудование, получение и обработка данных оптических съёмок с БПЛА); выбор объектов и разработка тематических продуктов проведены в рамках российско-британского проекта «Мультиплатформенный дистанционный мониторинг воздействия изменения климата на северные леса России». Проект финансируют Британский Совет (грант Institutional Links № 352397111) и Министерство науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61618X0099).

Литература

1. Алешко Р. А., Алексеева А. А., Шошина К. В., Богданов А. П., Гурьев А. Т. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 87–99.
2. Лесной план Мурманской области. Схема распределения лесов по преобладающим породам и группам возраста. 2019. URL: <https://mpr.gov-murman.ru/documents/lesplan/> (дата обращения: 07.12.2019).
3. Медведев А. А., Алексеенко Н. А. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для тематического крупномасштабного картографирования // Вопросы географии. 2017. Т. 144. С. 408–426.

4. Руководство пользователя Agisoft Metashape, Professional Edition: версия 1.5. 2019. 163 с. URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf.
5. Санников П. Ю., Андреев Д. Н., Бузмаков С. А. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 103–113.
6. Alexander C., Korstjens A. H., Hankinson E., Usher G., Harrison N., Nowak M. G., Abdullah A., Wich S. A., Hill R. A. Locating emergent trees in a tropical rainforest using data from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 72. P. 86–90.
7. Bohlin J., Wallerman J., Fransson J. E. S. Deciduous forest mapping using change detection of multi-temporal canopy height models from aerial images acquired at leaf-on and leaf-off conditions // Scandinavian J. Forest Research. 2016. V. 31. No. 5. P. 517–525.
8. Dandois J. P., Ellis E. C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 136. P. 259–276.
9. Giannetti F., Chirici G., Gobakken T., Næsset E., Travaglini D., Puliti S. A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 213. P. 195–205.
10. Gobakken T., Korhonen L., Næsset E. Laser-assisted selection of field plots for an area-based forest inventory // Silva Fennica. 2013. V. 47. No. 5. Article ID 943. P. 1–20.
11. Goodbody T. R. H., Coops N. C., White J. C. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions // Current Forestry Reports. 2019. V. 5. No. 2. P. 55–75.
12. Granholm A.-H., Olsson H., Nilsson M., Allard A., Holmgren J. The potential of digital surface models based on aerial images for automated vegetation mapping // Intern. J. Remote Sensing. 2015. V. 36. No. 7. P. 1855–1870.
13. Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery // Forests. 2013. V. 4. No. 4. P. 922–944.
14. Mohan M., Silva C. A., Klauberg C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A. T., Dia M. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest // Forests. 2017. V. 8. No. 9. Article ID 340. P. 1–17.
15. Næsset E. Determination of mean tree height of forest stands by digital photogrammetry // Scandinavian J. Forest Research. 2002. V. 17. No. 5. P. 446–459.
16. Ni W., Sun G., Pang Y., Zhang Z., Liu J., Yang A., Wang Y., Zhang D. Mapping three-dimensional structures of forest canopy using UAV stereo imagery: evaluating impacts of forward overlaps and image resolutions with LIDAR data as reference // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. V. 11. No. 10. P. 3578–3589.
17. Puliti S., Ene L. T., Gobakken T., Næsset E. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 194. P. 115–126.
18. Puliti S., Saarela S., Gobakken T., Ståhl G., Næsset E. Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 204. P. 485–497.
19. Tang L., Shao G. Drone remote sensing for forestry research and practices // J. Forestry Research. 2015. V. 26. No. 4. P. 791–797.
20. Tanhuanpää T., Saarinen N., Kankare V., Nurminen K., Vastaranta M., Honkavaara E., Karjalainen M., Yu X., Holopainen M., Hyypä J. Evaluating the performance of high-altitude aerial image-based digital surface models in detecting individual tree crowns in mature boreal forests // Forests. 2016. V. 7. No. 7. Article ID 143. P. 1–17.
21. Tuominen S., Balazs A., Saari H., Pölönen I., Sarkeala J., Viitala R. Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables // Silva Fennica. 2015. V. 49. No. 5. Article ID 1348. P. 1–19.
22. White J. C., Coops N. C., Wulder M. A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review // Canadian J. Remote Sensing. 2016. V. 42. No. 5. P. 619–641.
23. Zhang J., Hu J., Lian J., Fan Z., Ouyang X., Ye W. Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring // Biological Conservation. 2016. V. 198. P. 60–69.

Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests

A. A. Medvedev, N. O. Telnova, A. V. Kudikov, N. A. Alekseenko

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia

E-mail: natalia.telnova@gmail.com

The paper considers the methods of acquisition and processing of optical data from small Unmanned Air Vehicles (UAVs) — photogrammetric point clouds and derivative 3d-models — for the automatic extraction of explicit structure variables in sparse boreal forests of the central part of Kola Peninsula. We review main technological issues of UAV optical surveys, present flowcharts of point clouds classification for the extraction of canopy height model (CHM), further CHM analysis, tree-level and area-based estimation of structural forest variables. Main tree-level variables are crown heights and extent; for forest stands CHM analysis leads to gridded data on tree canopy heights, amount of canopy peaks and tree density, share of tree cover. The definite limitations of optical photogrammetry connected with CHM extraction in dense forests can be partly overcome due to the complex use of point clouds from summer and winter (leaf-off) surveys and independent processing flow of CHM in forest stands with sparser and denser tree canopies.

Keywords: 3d-structure of forest stands, forest stands, canopy height models, density of tree canopy, photogrammetric point clouds, UAVs

Accepted: 21.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163

References

1. Aleshko R. A., Alekseeva A. A., Shoshina K. V., Bogdanov A. P., Guriev A. T., Razrabotka metodiki aktualizatsii informatsii o lesnom uchastke s ispol'zovaniem snimkov so sputnikov i malykh BPLA (Development of the methodology to update the information on a forest area using satellite imagery and small UAVs), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 87–89.
2. *Lesnoi plan Murmanskoi oblasti. Skhema raspredeleniya lesov po preobladayushchim porodam i gruppam vozrasta* (Forest plan of Murmansk region. Scheme of forest distribution by dominant species and age classes), 2009, available at: <https://mpr.gov-murman.ru/documents/lesplan/> (accessed 07.12.2019).
3. Medvedev A. A., Alekseenko N. A., Perspektivy primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya tematicheskogo krupnomasshtabnogo kartografirovaniya (Perspectives for the use of unmanned aerial vehicles (UAV) for large-scale thematic mapping), *Voprosy geografii*, 2017, Vol. 144, pp. 408–426.
4. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition. Version 1.5*, 2019, URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_ru.pdf.
5. Sannikov P. Yu., Andreev D. N., Buzmakov S. A., Vyyavlenie i analiz sukhostoya pri pomoshchi bespilotnogo letatel'nogo apparata (Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 103–113.
6. Alexander C., Korstjens A. H., Hankinson E., Usher G., Harrison N., Nowak M. G., Abdullah A., Wich S. A., Hill R. A., Locating emergent trees in a tropical rainforest using data from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, Vol. 72, pp. 86–90.
7. Bohlin J., Wallerman J., Fransson J. E. S., Deciduous forest mapping using change detection of multi-temporal canopy height models from aerial images acquired at leaf-on and leaf-off conditions, *Scandinavian J. Forest Research*, 2016, Vol. 31, No. 5, pp. 517–525.
8. Dandois J. P., Ellis E. C., High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 136, pp. 259–276.
9. Giannetti F., Chirici G., Gobakken T., Næsset E., Travaglini D., Puliti S., A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 213, pp. 195–205.
10. Gobakken T., Korhonen L., Næsset E., Laser-assisted selection of field plots for an area-based forest inventory, *Silva Fennica*, 2013, Vol. 47, No. 5, Article ID 943, pp. 1–20.
11. Goodbody T. R. H., Coops N. C., White J. C., Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: a review of opportunities, challenges, and future directions, *Current Forestry Reports*, 2019, Vol. 5, No. 2, pp. 55–75.

12. Granholm A.-H., Olsson H., Nilsson M., Allard A., Holmgren J., The potential of digital surface models based on aerial images for automated vegetation mapping, *Intern. J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 36, No. 7, pp. 1855–1870.
13. Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P., A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery, *Forests*, 2013, Vol. 4, No. 4, pp. 922–944.
14. Mohan M., Silva C.A., Klauberg C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A.T., Dia M., Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest, *Forests*, 2017, Vol. 8, No. 9, Article ID 340, pp. 1–17.
15. Næsset E., Determination of mean tree height of forest stands by digital photogrammetry, *Scandinavian J. Forest Research*, 2002, Vol. 17, No. 5, pp. 446–459.
16. Ni W., Sun G., Pang Y., Zhang Z., Liu J., Yang A., Wang Y., Zhang D., Mapping three-dimensional structures of forest canopy using UAV stereo imagery: evaluating impacts of forward overlaps and image resolutions with LIDAR data as reference, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, Vol. 11, No. 10, pp. 3578–3589.
17. Puliti S., Ene L.T., Gobakken T., Næsset E., Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 115–126.
18. Puliti S., Saarela S., Gobakken T., Ståhl G., Næsset E., Combining UAV and Sentinel-2 auxiliary data for forest growing stock volume estimation through hierarchical model-based inference, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 485–497.
19. Tang L., Shao G., Drone remote sensing for forestry research and practices, *J. Forestry Research*, 2015, Vol. 26, No. 4, pp. 791–797.
20. Tanhuanpää T., Saarinen N., Kankare V., Nurminen K., Vastaranta M., Honkavaara E., Karjalainen M., Yu X., Holopainen M., Hyypä J., Evaluating the performance of high-altitude aerial image-based digital surface models in detecting individual tree crowns in mature boreal forests, *Forests*, 2016, Vol. 7, No. 7, Article ID 143, pp. 1–17.
21. Tuominen S., Balazs A., Saari H., Pölönen I., Sarkeala J., Viitala R., Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables, *Silva Fennica*, 2015, Vol. 49, No. 5, Article ID 1348, pp. 1–19.
22. White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P., Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review, *Canadian J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 42, No. 5, pp. 619–641.
23. Zhang J., Hu J., Lian J., Fan Z., Ouyang X., Ye W., Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring, *Biological Conservation*, 2016, Vol. 198, pp. 60–69.